

АКУСТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА $1/f$
В «СУББЛОЧНЫХ» КРИСТАЛЛАХ $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$

© Я.М.Олих, Ю.Н.Шавлюк

Институт физики полупроводников академии наук Украины,
252650 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 26 марта 1996 г.)

В окончательной редакции 2 июля 1996 г.)

Впервые экспериментально показано, что путем ультразвуковой (УЗ) обработки ($f = 10$ МГц) исходных кристаллов $h-Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ можно значительно (в 10–100 раз) уменьшать уровень шума $1/f$. Рассмотрены возможные механизмы эффекта УЗ-улучшения электрофизических и шумовых параметров материала. Определены критерии выбора оптимальных режимов УЗ-обработки для «субблочных» кристаллов.

Несмотря на широкое практическое применение в ИК-технике, кристаллы $CdHgTe$ остаются структурно-несовершенными. Наряду с собственными точечными дефектами характерными нарушениями являются ростовые дислокации (до 10^6 см⁻²) и малоугловые границы (МУГ) между «субблоками», линейная плотность которых $N_b = 5-90$ см⁻¹ [1]. Вблизи протяженных дефектов находится и большая часть примесных атомов (в виде включений второй фазы) [2]. Такие локальные дефекто-примесные области характеризуются повышенными механическими и электрическими напряжениями и, естественно, понижают электрофизические (ЭФ) и фотоэлектрические (ФЭ) параметры материала. Во многом протяженные дефекты ответственны за уровень шума в приборных структурах [3,4].

С другой стороны, именно протяженные дефекты определяют механические свойства кристаллов и очень высокую чувствительность $CdHgTe$ к ультразвуковому (УЗ) воздействию [5–8]. Причем эффективность акустостимулированных преобразований дефектной структуры, как было показано экспериментально, имеет «квазирезонансный» характер [7,8], а именно оптимальный эффект УЗ-улучшения ЭФ- и ФЭ-параметров наблюдается частоте УЗ, близкой к частоте собственных колебаний «субблоков» $f_b = v_{us}N_b/2$ (v_{us} — скорость УЗ). Действительно, такие макродефекты — «субблоки» — разделены стенками дислокаций (малоугловыми границами) и гораздо слабее связаны с соседними областями кристалла, чем атомы в кристаллической плоскости. Поэтому эти области могут характеризоваться собственными квазилокальными колебаниями, и даже при малых интенсивностях

внешнего УЗ на резонансных частотах возможна эффективная трансформация УЗ-энергии в энергию внутренних колебательных состояний [9]. В дальнейшем поглощенная в МУГ энергия интенсифицирует диффузионные процессы перераспределения точечных неравновесных дефектов между объемом «субблока» и МУГ. «Насыщение» электронных связей МУГ должно снижать вероятность захвата носителей и приводить в свою очередь к росту времени жизни [8].

Таким образом, «субблочные» кристаллы CdHgTe представляют весьма удобным модельным объектом для изучения возможностей использования УЗ для управления свойствами реальных полупроводниковых материалов, что является в настоящее время перспективным направлением физической акустики кристаллов в целом и ближайшим практическим простым решением проблемы улучшения данного материала в частности.

Целью данной работы было изучение возможности направленного влияния активного ультразвука на шумовые характеристики образцов $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ в зависимости от интенсивности и длительности обработки.

1. Методика эксперимента

В настоящей работе исследованы два набора образцов, вырезанных (в одном и том же направлении) из двух пластин $n\text{-CdHgTe}$: десять из пластины *A* и четыре из пластины *B*. Плотность МУГ для всех образцов определялась методом селективного травления [2] и

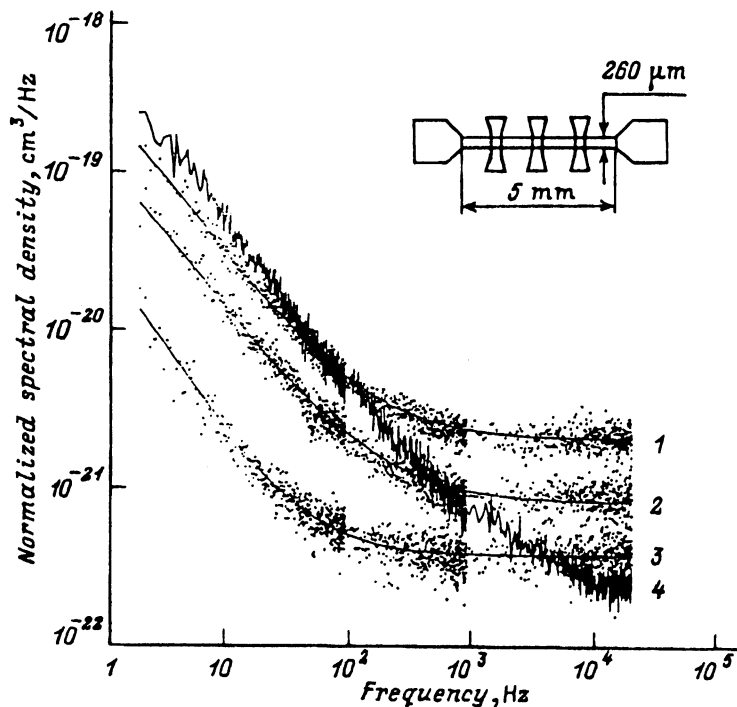


Рис. 1. Нормализованные (α/fn) спектральные зависимости шума в образцах $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$, подвергнутых УЗО в течение 20 min с различной интенсивностью. $W(\text{W}/\text{m}^2)$: 1 — 0, 2 — 10, 3 — 10^3 , 4 — 10^4 . На вставке приведена схема образца с электрическими контактами.

составляла $20-60 \text{ см}^{-1}$ для образцов пластины A и $40-70 \text{ см}^{-1}$ для пластины B . УЗ-обработка (УЗО) всех образцов, за исключением контрольных, проводилась при комнатной температуре с помощью продольных волн на частоте 8.8 и 9.9 МГц (пластины A и B соответственно). После УЗО с поверхности заготовок удалялся нарушенный слой и методом фотолитографии изготавливались измерительные образцы специальной формы (см. вставку на рис. 1). Их размер составлял $(4-5) \cdot 10^3 \times (200-300) \times (20-40) \mu\text{м}$. Омические контакты создавались электрохимическим осаждением индия на свежепротравленную поверхность. Шумовые и холловские измерения проведены при температурах 80–85 К. Спектральная плотность флуктуаций напряжения измерена по стандартной четырехзондовой методике в диапазоне частот $(1-2) \cdot 10^4 \text{ Hz}$ с помощью цифрового анализатора спектра, использующего алгоритм быстрого преобразования Фурье, и машинной обработки массивов данных [4].

2. Результаты и их обсуждение

Для характеристики уровня шума использован параметр Хоуге [10] $\alpha = (S_u(f)/U^2)fn\Omega$, где $S_u(f)$ — спектральная плотность флуктуаций напряжения, U — постоянное напряжение на измеряемом участке образца, Ω — его объем, n — концентрация носителей. Для расчета использовались значения $S_u(f)$ на частоте 30 Hz, где вклад генерационно-рекомбинационной компоненты не превышал 5–15%. Для образцов пластины B из зависимости спектральной плотности шума от величины протекающего тока $S_u(f) \sim I^\beta$ определены также значения параметра β .

На рис. 1 представлены типичные спектральные зависимости шума для ряда образцов пластины A , подвергнутых УЗО в течение 20 min с различной интенсивностью. Наблюдаемые зависимости (α/fn) характеризуются двумя качественно различными областями изменений: в низкочастотной (до 10^2 Hz) $(\alpha/fn) \sim 1/f^\gamma$, где $\gamma \approx 1$, а в высокочастотной (10^3-10^4 Hz) α/fn практически не меняется. С увеличением интенсивности УЗО до 10^3 W/m^2 (кривые 2 и 3) происходит значительное снижение (в 10–100 раз) плотности шума во всем исследуемом частотном диапазоне. При этом несколько увеличивается крутизна спектральной зависимости γ (от 0.9 до 1.0). Более интенсивная УЗО ($W = 10^4 \text{ W/m}^2$) повышает уровень шума в низкочастотной области (несколько выше исходного уровня) при дальнейшем снижении ВЧ-плато (кривая 4).

С целью выяснения физических процессов при УЗО в кристаллах $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ нами исследованы наряду с шумовыми характеристиками (α и β) также ЭФ-параметры (концентрация электронов n и их подвижность μ) в процессе варьирования не только интенсивности УЗО W , но и ее продолжительности — времени УЗО t_{us} . Как видно из рис. 2, все амплитудные (в зависимости от W) характеристики УЗО как для n , μ , так и для α являются немонотонными. Такой характер изменения ЭФ-параметров ранее уже был исследован в работе [11]. УЗО кристаллов $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ допороговой интенсивности ($W < 2 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$)

и в нашем случае приводит к увеличению n и μ . Напомним здесь, что проводимость исследуемых узкозонных полупроводниковых кристаллов CdHgTe при 85 K имеет примесный характер ($n = N_d - N_a$, где N_d — суммарная концентрация донорных атомов, включая и межзольные атомы ртути Hg_1 , а N_a — концентрация акцепторов, в основном это вакансии ртути V_{Hg} , $\mu_{77K} \approx (N_d + N_a)^{-1}$) [1]. С учетом этого, а также из экспериментальных данных следует, что в процессе УЗО ($W < 10^3 \text{ W/m}^2$) уменьшаются степень компенсации и N_a . Одновременно наблюдается значительное (больше чем в 10 раз) снижение уровня шума. При повышении интенсивности УЗО до 10^4 W/m^2 начинаются деградация (уменьшение) ЭФ-параметров и возрастание параметра α .

Внешне подобные (как при увеличении W) акустостимулированные изменения ЭФ- и шумовых характеристик CdHgTe наблюдаются и при увеличении длительности УЗО t_{us} (рис. 3). Построенные временные зависимости позволяют разделить процесс акустостимулированных изменений на три стадии: 1) быстрая стадия ($\tau_1 < 10^2 \text{ s}$), когда про-

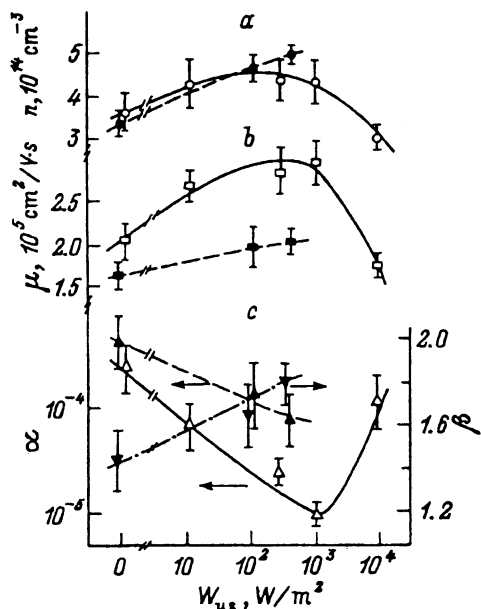


Рис. 2. Зависимости концентрации электронов n (а), их холловской подвижности μ (б), а также уровня шума — параметра Хоуге α и параметра β (с) — от интенсивности УЗО W в течение постоянного времени t_{us} ($T = 85 \text{ K}$).

Светлые точки соответствуют образцам пластины А ($t_{us} = 20 \text{ min}$), темные — образцам пластины В ($t_{us} = 15 \text{ min}$). Приведенные на графиках значения параметров усреднены по разным участкам образца, вертикальные отрезки указывают границы наблюдаемого разброса.

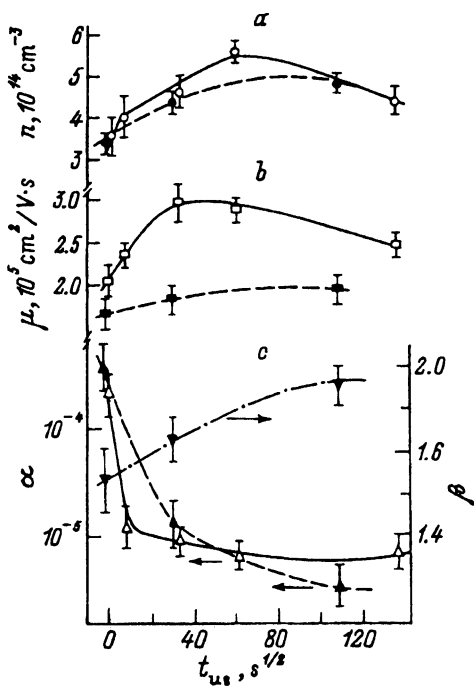


Рис. 3. Зависимости концентрации электронов n (а), их холловской подвижности μ (б), а также уровня шума — параметра Хоуге α и параметра β (с) — от времени УЗО при постоянной интенсивности $W = 10^3 \text{ W/m}^2$ ($T = 85 \text{ K}$).

Светлые точки соответствуют образцам пластины А, темные — образцам пластины В.

исходит резкое уменьшение уровня шума (рис. 3, *c*); 2) стадия более медленных ($\tau_2 \approx 10^3$ s) изменений в сторону улучшения ЭФ-параметров и дальнейшего плавного снижения шума (рис. 3, *a, b* и *c* соответственно); 3) при $\tau_3 > 10^4$ s начинают преобладать деградиационные эффекты, наблюдается тенденция к уменьшению концентрации и подвижности электронов и увеличению уровня шума.

На первых двух стадиях УЗО наблюдается увеличение параметра квадратичности β от 1.5 до 1.9 (рис. 2, *c* и 3, *c*). Заметим, что отклонение токовой зависимости от квадратичности, как и разброс шумовых и ЭФ-параметров для разных участков образца (что отображено на рис. 2, 3 вертикальными отрезками), определенно указывает на неоднородность исследуемых материалов, связанную с наличием включений HgTe, Te, дислокаций и МУГ [1,2,4]. Возникновением на границах таких включений потенциальных барьеров объясняют и неквадратичность токовой зависимости [3,4].

Иным возможным механизмом неквадратичности β в $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ может быть разогрев носителей в объеме обогащенных ртутью включений, причем даже в относительно слабых электрических полях [10,12]. Наблюдаемое нами увеличение β при УЗО, безусловно, связано с существенным уменьшением микронеднородности по образцу, возможным распадом микровключений и снижением потенциальных барьеров.

Продолжительные (долговременные) изменения параметров $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ в течение УЗО при постоянной интенсивности W (рис. 3) свидетельствуют о преобладающих диффузионных процессах. Действительно, возрастание n и μ напоминает отжиг кристаллов CdHgTe в парах ртути [1,13]. Отличие заключается в том, что процесс УЗО происходит при комнатной температуре и в качестве источников ртути выступают любые обогащенные ртутью внутренние образования. Например, HgTe или те же дислокации и МУГ.

Заметим, что при УЗО возможны и обратные процессы, а именно стимулированное УЗ-геттерирование подвижных дефектов на стоки [8,11]. Направление процесса определяется исходным состоянием границы и объема (градиентом концентрации того или иного дефекта).

Рассмотрим модель «акустостимулированного отжига» кристаллов $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ более детально. При УЗО «субблочного» образца основная часть акустической энергии поглощается на МУГ и дислокациях. За счет локального увеличения температуры и в условиях градиента упругих напряжений (поля колебательных деформаций) происходит отрыв геттерированных на МУГ избыточных (при температуре УЗО) собственных и примесных точечных дефектов (в первую очередь атомов ртути) и диффузионное их движение в глубь «субблоков». Проведем количественную оценку характерных параметров. Как видно из рис. 3, оптимальный режим УЗО достигается за время $t_{\text{us}}^{\text{op}} \approx 2 \cdot 10^3$ s. Можно предположить, что именно за это время устанавливается равновесное распределение концентрации ртути по образцу (по объему «субблока») и происходит ее рекомбинация (залечивание) с вакансиями. Исходя из среднего (для исследованных образцов) размера зерна «субблока» $L = N_b^{-1} = 200 \mu\text{m}$, оценим эффективный коэффициент диффузии $D_{\text{Hg}}^{\text{ef}} = (L/2)^2/t_{\text{us}}^{\text{op}} \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Экстраполяция литературных данных о коэффициенте диффузии атомов ртути в $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ до $T = 300\text{ K}$ дает величину $D_{\text{Hg}}^r = = 10^{-9} - 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ [13,14]. Превышение $D_{\text{Hg}}^{\text{ef}}$ над D_{Hg}^r можно объяснить двумя факторами: 1) повышением температуры образца в процессе УЗО и/или 2) уменьшением энергии отрыва дефекта и энергии его движения при этом.

По данным [7], коэффициент акустических потерь в $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ на частоте 10 MHz при $W = 10^3 \text{ W/m}^2$ составляет $\delta = 0.1 \text{ cm}^{-1}$. Поскольку время установления однородной температуры по образцу толщиной $d = 1\text{ mm}$ не превышает $d^2/\kappa = 10^{-1} \text{ s}$ (коэффициент теплопроводности $\kappa = 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ [15]), процесс диффузии в течение t_{us} в объеме образца можно считать происходящим при постоянной температуре T_{us} . Значение T_{us} определим из условия теплового баланса в образце, а именно поглощаемая акустическая энергия равна потоку тепла, выходящего из пластины $W(1 - \exp(-2\delta d)) = k(T_{\text{us}} - T_0)$, где k — коэффициент теплопередачи. При $k = 0.4 - 4.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [16] $(T_{\text{us}} - T_0) = 10 - 100\text{ K}$. Действительно, максимальный разогрев образца в процессе УЗО, измеренный экспериментально при $W = 5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, составлял $(T_{\text{us}} - T_0) = 40 - 60\text{ K}$. Возможное увеличение D_{Hg} за счет такого нагрева не больше 2 раз. Это указывает на то, что объяснить залечивание вакансий ртути в результате УЗО только за счет теплового эффекта не удастся. Остается предположить, что в условиях интенсивной колебательной деформации кристалла, как ранее показано теоретически [17], и для $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ имеет место заметное УЗ-ускорение (до 10^2 раз) диффузии атомов ртути.

Время установления температуры по образцу, равное 10^{-1} s (по «субблоку» 10^{-3} s), во много раз превосходит период УЗ-колебаний (10^{-7} s), что не исключает возможности локального значительного повышения (колебания) температуры на самой границе и, как следствие, увеличения вероятности отрыва дефекта. Полагаем, что именно с таким процессом «импульсного теплового сброса» заряженных дефектов с МУГ (и дислокаций), а также релаксацией внутренних механических напряжений и в результате резким снижением потенциальных барьеров связано «быстрое» ($\tau_1 \approx 10^2 \text{ s}$) уменьшение шума (рис. 3, с).

Заметим, что дополнительными источниками атомов ртути (кроме дефектно-примесных атмосфер МУГ и дислокаций) могут быть также HgTe -кластеры, распадающиеся в результате УЗО [18]. Однако, если учесть низкую концентрацию таких включений и очень малую вероятность взаимодействия с ними УЗ-волн мегагерцевого диапазона (амплитуда колебаний достаточно высокочастотной для эффективного взаимодействия с кластером гармоника пренебрежимо мала), определяющего значения названный механизм не имеет.

Еще более медленные и слабые деградационные изменения ЭФ-параметров (заметные за времена УЗО $\tau_3 \approx 10^4 \text{ s}$) объясняются дополнительным (конкурирующим с «залечиванием») процессом генерации вакансий ртути (например, вблизи колеблющихся под действием ультразвука дислокаций и МУГ [9]). При длительных УЗО истощаются источники атомов ртути и начинают преобладать процессы генерации

и диффузии вакансий, а также «загрязнение» матрицы кристалла иными примесями [2].

Что касается деградационного влияния УЗО на параметры кристаллов CdHgTe при $W > 10^4 \text{ W/m}^2$ (рис. 2), то здесь эффект, безусловно, связан с генерацией новых («свежих») дефектов (как точечных, так и дислокаций [20]). При больших W становится возможным и распад твердого раствора в поле локальных колебательных напряжений.

Итак, в данной работе впервые показано, что путем УЗО кристаллов n -CdHgTe можно значительно (в 10–100 раз) уменьшать уровень шума $1/f$. Предложена модель эффекта, состоящая в достижении более полной гомогенизации материала путем УЗ-интенсификации диффузионных процессов внутреннего легирования объема материала атомами ртути. В рамках модели определены критерии выбора оптимальных режимов УЗО «субблочных» кристаллов CdHgTe, которые подтверждены экспериментально.

Авторы благодарят К.А. Мысливец за измерение плотностей МУГ и дислокаций в исходных образцах CdHgTe и В.О. Петрякова за технологическую помощь при изготовлении измерительных образцов.

Список литературы

- [1] R. Dornhaus, G. Nimtz. *Narrow Gap Seemicond.* Springer Tracts in Modern Physics. Springer. Berlin (1985). Bd 98. S. 119.
- [2] А.В. Филатов, О.Б. Невский, И.Б. Каган, В.В. Крапунин, Е.Н. Холина, Е.В. Сузов. *Кристаллография* **33**, 5, 1232 (1988).
- [3] H.I. Hanafi, Van Der Ziel. *Solid State Electron.* **21**, 1019 (1978).
- [4] I.S. Bakshi, L.A. Karachevtseva, A.V. Lybchenko, B.I. Khignyak. *Phys. Stat. Sol. (a)* **117**, 1, K37 (1990).
- [5] А.В. Любченко, Я.М. Олих. *ФТТ* **27**, 8, 2505 (1985).
- [6] А.Н. Аннанизов, А.Е. Беляев, Г. Гарягдыев, А.П. Здебский, Е.А. Сальков. *УФЖ* **33**, 11, 1694 (1988).
- [7] В.Ф. Калитенко, Я.М. Олих, В.М. Перга. *УФЖ* **33**, 5, 788 (1988).
- [8] К.А. Мысливец, Я.М. Олих. *ФТТ* **32**, 10, 2802 (1990).
- [9] В.Г. Воеводин, В.Е. Степанов. *Изв. вузов. Физика* **37**, 11, 39 (1994).
- [10] Ш.М. Коган. *УФН* **145**, 2, 285 (1985).
- [11] Л.А. Карачевцева, А.В. Любченко, К.А. Мысливец, Я.М. Олих. *УФЖ* **35**, 3, 468 (1990).
- [12] R.F. Voss, J. Clarke. *Phys. Rev.* **B13**, 556 (1976).
- [13] Ф.А. Зайтов, Ф.К. Исаев, А.В. Горшков. *Дефектообразование и диффузионные процессы в твердых растворах.* Азернеур, Баку (1984). 211 с.
- [14] P.C. Enderson, H.F. Shaake, J.H. Tregilgas. *J. Vac. Sci. Technol.* **21**, 125 (1982).
- [15] Н.Н. Берченко, В.Е. Кревс, В.Г. Средин. *Полупроводниковые твердые растворы и их применение.* Воениздат. М. (1982). 208 с.
- [16] Г. Карслоу, Д. Егер. *Теплопроводность твердых тел.* Наука. М. (1964). 487 с.
- [17] А.С. Бакай, И.П. Лозинский. *ФТТ* **28**, 8, 2455 (1986).
- [18] П.И. Баранский, А.Е. Беляев, С.М. Комиренко, Н.В. Шевченко. *ФТТ* **32**, 7, 2159 (1990).
- [19] И.В. Островский. *Акустолюминесценция и дефекты кристаллов.* Вища шк. Киев (1993). 220 с.
- [20] К.А. Мысливец. *Автореф. канд. дис.* Киев (1990).